

*Визначені основні різновиди вибірок для елементів залягання тріщин покладів лабрадориту та обґрунтовані оптимальні методики кластерного аналізу. Досліджено взаємозв'язок між кількістю тріщин в системі та їх просторовою орієнтацією для оптимізації вибору напрямку розвитку гірничих робіт. Для оцінки перспективності розробки родовищ або окремих ділянок запропоновано нову кластерно-геометричну методику визначення блочності*

*Ключові слова: кластерний аналіз, декоративний камінь, тріщинуватість, блочність, орієнтування фронту видобувних робіт*

*Определены основные разновидности выборки для элементов залегания трещин месторождений лабрадорита и обоснованы оптимальные методики кластерного анализа. Исследована взаимосвязь между количеством трещин в системе и их пространственной ориентацией для оптимизации выбора направления развития горных работ. Для оценки перспективности разработки месторождений или отдельных участков предложена новая кластерно-геометрическая методика определения блочности*

*Ключевые слова: кластерный анализ, декоративный камень, трещиноватость, блочность, ориентирование фронта добычных работ*

# КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ТРИЩИНУВАТОСТІ ПОКЛАДІВ ДЕКОРАТИВНОГО КАМЕНЮ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ БЛОЧНОЇ СИРОВИНИ

**Р. В. Соболевський**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: rvsobolevsky@rambler.ru

**Н. В. Зуєвська**

Доктор технічних наук, професор

Кафедра геотехнічного будівництва

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: turtrans@email.ua

**В. В. Коробійчук**

Кандидат технічних наук, доцент\*\*

E-mail: kgtkvv2@rambler.ru

**О. М. Толкач**

Кандидат технічних наук\*\*

E-mail: oltolkach@gmail.com

**В. В. Котенко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: vladimir\_kotenko@ukr.net

\*Кафедра маркшейдерії\*\*\*

\*\*Кафедра розробки родовищ

корисних копалин ім. проф. Бакка М. Т.\*\*\*

\*\*\*Житомирський державний технологічний університет

вул. Черняховського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

## 1. Вступ

При розробці родовищ декоративно-облицювального каменю економічна ефективність видобування в значній мірі буде залежати від ефективності управління технологічними процесами. Згідно результатів досліджень підходів до процесу видобування блоків декоративного каменю [1–8] ефективність використання окремих технологічних процесів та продуктивність всього комплексу видобувного обладнання визначається як природними так і технологічними показниками. Слід зазначити, що серед природних чинників найбільш суттєво на ефективність видобування блоків впливає тріщинуватість. При плануванні гірничих робіт необхідно забезпечити максимальне врахування просторової орієнтації та відстаней між площинами тріщин. Дані фактори визначають параме-

три системи розробки покладу, тому помилка їх оцінки потенційно може призвести до значних економічних втрат, що підкреслює важливість правильного вибору методу аналізу.

Для систематизації природної тріщинуватості використовуються різноманітні методи, які відрізняються своєю ефективністю та достовірністю. Для аналізу складних вибірок при розв'язанні різноманітних задач оптимізації часто застосовують методи кластерного аналізу. Такий підхід в багатьох випадках дозволяє одержати порівняно кращі результати систематизації результатів вимірювань та значно підвищити ефективність прогнозування.

Тому можна вважати, що використання кластерного аналізу з великим ступенем ймовірності дозволить підвищити ефективність процесу управління якістю блочної сировини.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

При аналізі ефективності управління процесом видобування блочного каменю застосовувались різні підходи. Так, в [1] розглянуто питання оптимізації планування роботи технологічного комплексу. Інші автори оцінювали ефективність управління за ступенем врахування параметрів тріщинуватості покладу [2–6]. Причому, особлива увага приділялась методиці вимірювання елементів тріщин. Так, в [2] досліджено ефективність визначення параметрів тріщинуватості при використанні георадару (GPR) та її вплив на якість масиву природнього каменю. В [3] було досліджено вплив природньої тріщинуватості на продуктивність технологічних комплексів. Можна виділити також групу робіт [4–11], основною задачею яких була оцінка блочності покладів декоративного каменю. Дана група публікацій характеризується різноманітністю підходів до визначення блочності, що частково зумовлено різними типами порід, для яких проводились дослідження. Так в праці [4, 5] велика увага приділена оцінці блочності на основі аналізу геометричних співвідношень між системами тріщин. Дослідження впливу тріщинуватості на якість покладу декоративного каменю вивчалась в працях [6–11]. В [6] досліджувалась методика оцінки покладу декоративного каменю для одержання блочних продукції на основі результатів заміру тріщинуватості. В [7] оцінка якості покладу виконана для високоблочних родовищ мармуру. В [8] на основі моделювання систем тріщин та розривів оцінена блочність покладу, причому особливістю є використання кубів замість класичних паралелепіпедів для моделі штучного блоку. В [9] виконане геостатистичне моделювання ефективності видобування блочного каменю при застосуванні різання, що суттєво звужує сферу застосування результатів даного дослідження, і потребує подальшого комплексного врахування впливу інших технологій при плануванні розвитку гірничих робіт. В [10] виконана оцінка економічної ефективності видобування блоків при різних підходах до орієнтації фронту робіт. Та в раніше виконаних дослідженнях впливу природних факторів на ефективність розробки покладу декоративного каменю [11] використовувалась оцінка якості покладу на основі застосування дистанційних методів вивчення тріщинуватості та математичного моделювання ефективності розробки одержаної моделі природньої окремості в залежності від вибраного напрямку розвитку гірничих робіт. Підвівши підсумок публікацій, які присвячені визначенню напрямку розвитку гірничих робіт на родовищах блочного каменю, можна зробити висновок, що тріщинуватість покладу є домінуючим показником його якості і в значній мірі визначає напрямку розвитку гірничих робіт та структуру комплексної механізації видобувних процесів. Тому розробка ефективних методик оцінки закономірностей розвитку та просторової орієнтації систем природних тріщин є актуальною науково-прикладною задачею. В попередніх дослідженнях авторами [12] виконувався аналіз закономірностей зміни структурних показників родовищ лабрадориту на основі кластерного аналізу без дослідження ефективності кластеризації для різних вибірок, що дещо обмежує межі використання даного підходу для певної частини родовищ лабрадориту.

В роботі [13] запропонований нечіткий алгоритм кластеризації К-середніх, який має можливість використовувати додаткову інформацію про розриви, а також їх орієнтацію в ході пошукового аналізу даних. Але в ході дослідження не визначено для яких конкретних умов перспективна реалізація даної методики. В [14] були розглянуті декілька алгоритмів кластеризації: Parzen and К-середніх, та оцінена їх ефективність на згенерованій вибірці та на реальних даних. До недоліків даного дослідження можна віднести застосування лише однієї еталонної вибірки та аналіз ефективності запропонованого підходу до аналізу даних лише для одного родовища. В роботі [15] використовувався алгоритм кластеризації К-середніх для аналізу елементів залягання тріщин вимірюваних за результатами лазерного сканування. Основним недоліком даного дослідження слід вважати відсутність аналізу ефективності застосування інших методів кластеризації.

Узагальнюючи результати досліджень ефективності застосування кластерного аналізу для тріщинуватості покладів декоративного каменю, можна визначити, що для оптимізації процесу управління якістю блочної сировини доцільно удосконалити існуючі або розробити нові методики аналізу тріщинуватості, які забезпечать ефективність їх використання для різних родовищ. Найбільш перспективним напрямком дослідження слід вважати вивчення ефективності використання різних методів кластеризації для виділення систем тріщин для типів вибірок, які характерні для родовищ декоративного каменю однієї генетичної групи. Обґрунтування ефективного методу кластеризації та його параметрів дозволить спростити реалізацію методики кластерного аналізу та значно підвищить ефективність систематизації результатів вимірів елементів залягання природних тріщин. Це дасть можливість значно підвищити точність визначення параметрів природньої окремості та відповідно оцінки блочності покладу та окремих його ділянок, що дозволить оптимізувати процес управління якістю блочної сировини.

## 3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробка методики кластерного аналізу тріщинуватості покладів декоративного каменю для оптимізації процесу управління якістю блочної сировини.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- аналіз параметрів вибірки замірів тріщин для покладів лабрадориту Житомирської області та вибір оптимального методу кластеризації;
- виділення систем тріщин для основних родовищ лабрадоритів Житомирської області;
- розробка нового методу визначення блочності родовища та його реалізація для умов окремого родовища.

## 4. Матеріали та методи дослідження

В якості об'єкту дослідження були обрані поклади лабрадориту Житомирської області, Україна. Даний вибір зумовлений двома факторами: цінністю сирови-

ни на світових ринках декоративного каменю та наявністю результатів попередніх досліджень. В результаті статистичного дослідження результатів замірів субвертикальної тріщинуватості, виконаних на основі використання методики, наведеної в [14], були одержані характеристики систем тріщин (табл. 1), виділених за методикою [12].

Аналіз даних, які наведені у табл. 1, та результатів попередніх досліджень [12–14] дозволяє обґрунтувати оптимальні параметри еталонних вибірок для аналізу ефективності та достовірності запропонованих рішень. Це дає підставу штучно одержати еталонні вибірки з сорока, шістдесяти, ста та двохсот випадково згенерованих значень азимутів та кутів падіння тріщин. Одержані вибірки підкоряються нормальному закону та характеризуються заданими параметрами розподілу. В результаті були сформовані чотири вибірки:

- 1) азимут простягання 45°, дисперсія 20°, кут падіння 85°, дисперсія 5°;
- 2) азимут простягання 135°, дисперсія 40°, кут падіння 85°, дисперсія 5°;
- 3) азимут простягання 215°, дисперсія 30°, кут падіння 80°, дисперсія 5°;
- 4) азимут простягання 305°, дисперсія 40°, кут падіння 80°, дисперсія.

**Характеристика параметрів орієнтування систем субвертикальних тріщин лабрадоритових масивів покладів лабрадориту Житомирської області**

№ з/п	Назва родовища	Кількість замірів	Виділені системи тріщин					
			повздожні – S		поперечні – Q		діагональні – D	
			Кількість	Дисперсія	Кількість	Дисперсія	Кількість	Дисперсія
1	Андріївське	31	17	45	11	45	3	3
2	Браженське-1	83	32	28	51	32	–	–
3	Верхолузьке	83	45	40	38	22	–	–
4	Головинське	131	47	53	77	42	7	36
5	Гута-Добринське	43	16	44	18	30	9	50
6	Добринське	30	11	40	15	55	4	10
7	Ковалівське	27	14	44	11	60	2	20
8	Миківське-1	62	25	50	31	30	6	25
9	Неверівське	42	24	70	18	45	–	–
10	Олегівське	45	23	60	16	50	6	35
11	Осницьке	60	31	33	29	28	–	–
12	Очеретянське	35	14	36	14	41	7	24
13	Федорівське	100	38	60	40	50	22	20

Аналіз результатів попередніх досліджень, виконаних в [12], в якій досліджено точність кластеризації еталонних вибірок, частоти застосування різних методів при дослідженнях тріщинуватості в працях [13–15], а також реалізації в прикладних програмних пакетах аналізу даних STATISTICA 13, MATLAB та CLUSTERDELTA, дозволив для обґрунтування оптимальної методики кластерного аналізу тріщинуватості виділити як найбільш перспективні методи К-середніх, EM, Варда.

Для оцінки якості кластеризації для визначення параметрів окремої системи тріщин при використанні

кожного окремого методу запропоновано використовувати індикатор якості кластеризації, який описується виразом (1). Даний показник формувався з міркувань оцінки середньоарифметичного значення з відносних відхилень результатів кластеризації значень азимута простягання, кута падіння системи тріщин та їх девіацій від еталонних значень. Прийняте рішення за базові значення прийняти параметри еталонних вибірок. Відповідно очевидним є ефективність використання даного показника для оцінки точності кластеризації. При цьому меншим значенням індексу якості кластеризації буде відповідати вища якість:

$$Q_i = \frac{1}{4} \left( \left| \frac{A_E - A_F}{A_E} \right| + \left| \frac{d_{A_E} - d_{A_F}}{d_{A_E}} \right| + \left| \frac{\delta_E - \delta_F}{\delta_E} \right| + \left| \frac{d_{\delta_E} - d_{\delta_F}}{d_{\delta_E}} \right| \right), \quad (1)$$

$A_E$  – еталонне значення азимута простягання системи тріщин, градуси;  $A_F$  – фактичне значення азимута простягання системи тріщин, градуси;  $d_{A_E}$  – еталонне значення девіації азимута простягання системи тріщин, градуси;  $d_{A_F}$  – фактичне значення девіації азимута простягання системи тріщин, градуси;  $\delta_E$  – еталонне значення кута падіння системи тріщин, градуси;  $\delta_F$  – фактичне значення кута падіння системи тріщин, градуси;  $d_{\delta_E}$  – еталонне значення девіації кута падіння системи тріщин, градуси;  $d_{\delta_F}$  – фактичне значення девіації кута падіння системи тріщин, градуси.

**Таблиця 1**

Результати кластеризації для еталонних вибірок з сорока, шістдесяти, ста та двохсот вимірювань відповідно наведені на рис. 1–4.

Спочатку досліджувались еталонні вибірки з заданими параметрами розподілу за допомогою STATISTICA 13. Далі були обрані 3 найбільш ефективних методи кластеризації, які були застосовані для аналізу.

Проаналізувавши діаграми індикатора якості кластеризації для різних вибірок, можна зробити висновок, що найменші значення, які відповідають максимальній якості виділення характеристик кожної конкретної системи тріщин, досить широко варіюються в залежності від кількості вимірювань і значень еталонної вибірки. Тому однозначно зробити висновок про ефективність певного методу кластеризації досить важко. Відповідно актуальним завданням є створення показника, який дозволить акумулювати значення індикаторів якості для різних систем в один інтегрований показник.

Виходячи з цих міркувань для кількісної оцінки ефективності кластеризації масиву даних з різною кількістю систем розроблено індекс якості вимірювань. Суть даного індексу полягає в оцінці ступеня впливу кількості систем тріщин на значення індикатора якості кластеризації. За своєю суттю даний показник є відношенням суми значень індикаторів якості кластеризації для кожної з виділених систем до кількості систем тріщин:

$$I_Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість систем тріщин, шт.

Для узагальнюючого аналізу чисельного експерименту по кластеризації даних зведені результати наведені на рис. 5.

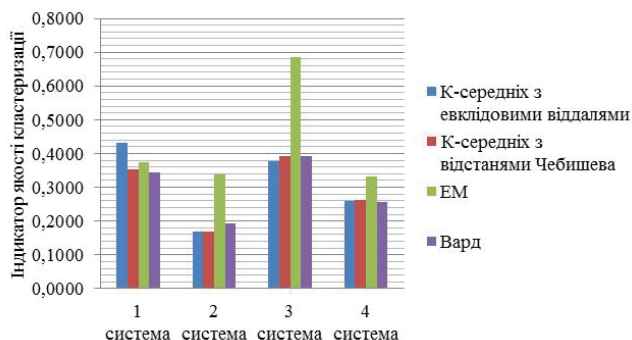


Рис. 1. Результати кластеризації для еталонної вибірки з 40 вимірювань

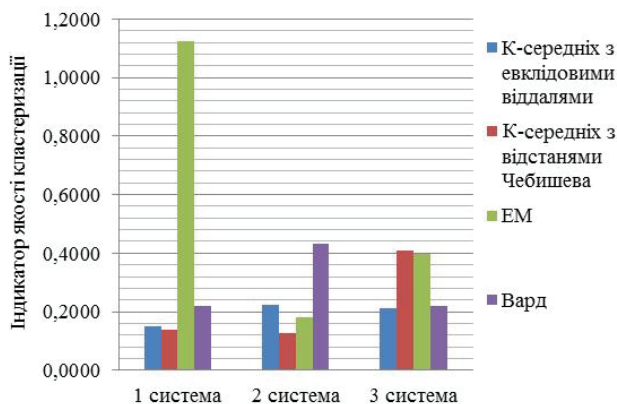


Рис. 2. Результати кластеризації для талонної вибірки з 60 вимірювань

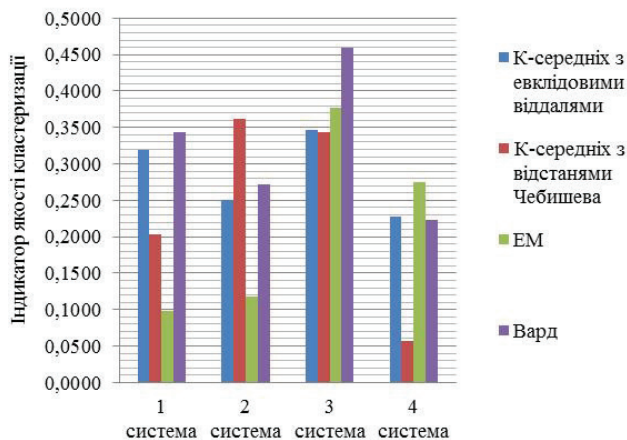


Рис. 3. Результати кластеризації для еталонної вибірки з 100 вимірювань

Аналіз зміни індексу якості вимірювань для різних методів кластеризації показав, що найбільш ефективним методом кластеризації виявився К-середніх з відстанями Чебишева, для даного методу характерні мінімальні коливання індексу якості вимірювань в

межах 0,22–0,28. Як альтернативу йому можна розглядати метод К-середніх з евклідовими відстанями. Для вибірки, яка складається з 200 вимірювань, всі методи кластеризації крім ЕМ дали близькі значення індексу якості вимірювань. Такий результат свідчить про те, що зі збільшенням вимірів елементів залягання природних тріщин вплив методу кластеризації мінімізується. Досить неочікувані результати одержані для методу ЕМ кластеризації: максимальні значення індексу похибки вимірювань для вибірок з 60 та 200 вимірювань та найменше значення для вибірки із 100 вимірювань. Враховуючи одержані результати, для подальших досліджень тріщинуватості родовищ декоративного каменю рекомендується прийняти метод кластеризації К-середніх з відстанями Чебишева.

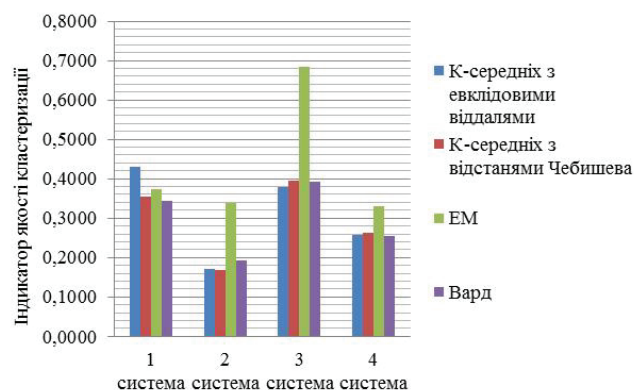


Рис. 4. Результати кластеризації для еталонної вибірки з 200 вимірювань

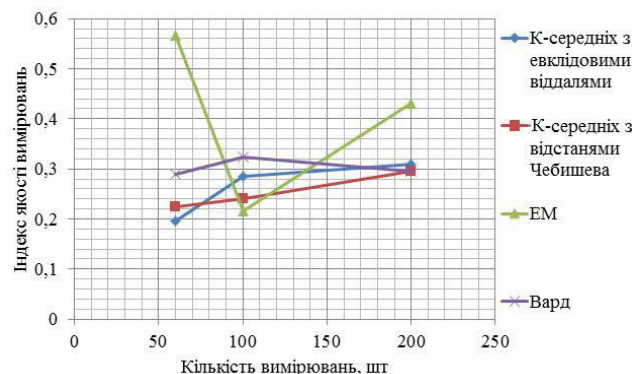


Рис. 5. Зведені результати кластеризації

## 5. Дослідження ефективності процесу управління якістю блочної сировини на основі кластерного аналізу

В результаті виконаного кластерного аналізу К-середніх з відстанями Чебишева були виділені основні системи тріщин на 13 родовищах лабораториту Житомирської області (табл. 2.)

Для оцінки якості кластеризації було визначено наявність кореляційного зв'язку між кількістю виділених систем тріщин та кількістю тріщин, які приймали участь в аналізі для кожного родовища. Значення коефіцієнта кореляції становить 0,132, що свідчить про відсутність зв'язку між зазначеними параметрами і підтверджує ефективність запропонованого підходу виділення систем тріщин.



Таблиця 2

## Результати кластерного аналізу для систематизації тріщинуватості покладів лабрадориту

Родовище	Параметри систем					
	Номер системи	Азимут простягання, градуси	Кут падіння, градуси	Кількість тріщин в системі, шт	Кількість тріщин, шт	Кількість систем, шт
Андріївське	1	184,33	89,750	12	31	4
	2	315,00	89,250	4		
	3	170,00	78,90	10		
	4	131,00	86,00	5		
Браженське	1	304,00	72,50	6	83	3
	2	36,53	84,31	51		
	3	304,81	83,42	26		
Верхолузьке	1	295,00	74,00	4	83	4
	2	289,17	86,75	12		
	3	62,00	72,58	12		
	4	56,31	85,29	55		
Гута-Добринське	1	290,00	8,00	1	42	4
	2	31,67	58,67	3		
	3	44,75	82,42	12		
	4	262,50	82,69	26		
Головинське	1	120,00	36,00	1	132	4
	2	23,95	89,12	43		
	3	116,92	83,46	48		
	4	27,50	78,52	40		
Добринське	1	41,53	90,00	19	30	2
	2	317,09	90,00	11		
Кам'янобрідське	1	122,20	81,64	25	72	4
	2	172,22	4,78	9		
	3	214,53	83,91	32		
	4	110,00	7,17	6		
Ковалівське	1	299,45	76,27	11	27	4
	2	182,70	82,00	10		
	3	270,00	58,33	3		
	4	90,00	69,33	3		
Миківське	1	16,22	83,56	9	62	6
	2	264,17	80,00	6		
	3	1,67	10,33	3		
	4	191,54	11,69	13		
	5	197,22	81,33	9		
	6	103,86	82,50	22		
Невірівське	1	93,33	31,67	6	42	3
	2	242,50	86,00	12		
	3	125,00	73,71	24		
Олегівське	1	68,71	87,29	24	45	6
	2	232,50	84,00	2		
	3	290,00	11,00	2		
	4	150,00	12,00	1		
	5	315,73	88,18	11		
	6	149,00	71,00	5		
Осницьке 1	1	68,71	87,29	24	45	6
	2	232,50	84,00	2		
	3	290,00	11,00	2		
	4	150,00	12,00	1		
	5	315,73	88,18	11		
	6	149,00	71,00	5		
Очеретянське	1	49,00	67,50	2	35	3
	2	309,80	87,75	20		
	3	40,00	86,54	13		
Федерівське	1	24,93	87,71	28	100	5
	2	320,00	10,00	1		
	3	319,73	86,19	26		
	4	96,09	86,62	34		
	5	211,27	86,82	11		

Важливе значення для обґрунтування напрямку розвитку фронту видобувних робіт має кількість тріщин певної орієнтації. В ході виконаного аналізу для всіх виділених систем тріщин було встановлено, що між орієнтацією тріщин і їх кількістю присутній слабкий кореляційний зв'язок, який характеризується коефіцієнтом кореляції – 0,331. В ході подальшого аналізу було виконано дослідження зв'язку між орієнтацією тріщин і їх кількістю для систем тріщин, виділених згідно класифікації [23].

Відповідно для вертикальних тріщин (кут падіння  $85^\circ$ – $90^\circ$ ) коефіцієнт кореляції становив 0,56, що дозволяє зробити висновок про вплив орієнтації даного типу тріщин на їх кількість. Схожа ситуація була характерна для горизонтальних систем тріщин (кут падіння  $0^\circ$ – $10^\circ$ ): коефіцієнт кореляції 0,831, дозволяє припускати наявність тісного кореляційного зв'язку, але мала кількість виділених систем (всього 4 значення) не дозволяє однозначно прийняти це припущення. Для субвертикальних ( $50^\circ$ – $85^\circ$ ) та субгоризонтальних ( $10,1^\circ$ – $50^\circ$ ) систем тріщин характерна фактична відсутність впливу орієнтації тріщин на їх кількість, що підтверджується відповідно коефіцієнтами кореляції – 0,246 та – 0,010.

Для прогнозування напрямку розвитку гірничих робіт та управління процесами видобування декоративного каменю одержано аналітичний вираз залежності кількості тріщин від азимуту простягання (рис. 6) у вигляді поліному другого ступеня:

$$N = 0,0005\alpha^2 - 0,227\alpha + 38,8532. \quad (3)$$

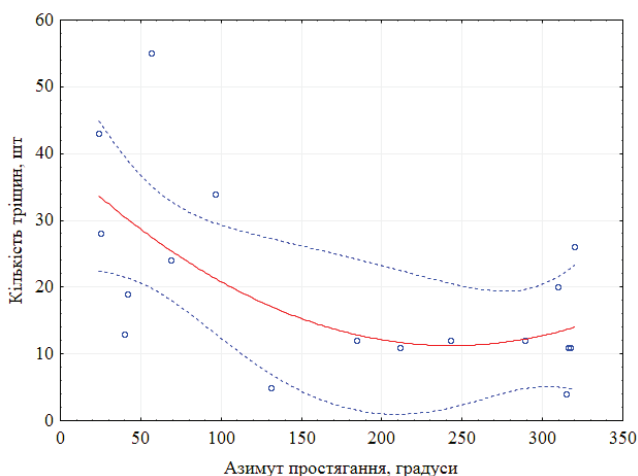


Рис. 6. Графічна залежність кількості вертикальних тріщин від азимуту простягання: — лінія регресії; — — — межі довірчого інтервалу

Інформація про системи тріщин важлива для оцінки основного критерію якості покладу декоративного каменю – блочності. Враховуючи досвід методик визначення блочності, які були реалізовані авторами в [6–8, 11], основним завданням для адекватної оцінки блочності є складання адекватної прогнозової моделі кутових та лінійних співвідношень систем тріщин. При визначенні кутових співвідношень найбільш раціональним підходом буде підхід до тріщини як площини у просторі. Тоді кутові співвідношення між системами тріщин можна буде визначати як кути між

площинами тріщин, які задані азимутами простягання та кутами падіння. Аналіз попередніх досліджень щодо просторового аналізу тріщинуватості дозволив для визначення площини тріщин прийняти вираз (4), який виведений в праці [16] для рівняння площини, виражений через координати початку тріщини та кути її простягання та падіння

$$\cos\theta \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot x + \sin\theta \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot y + z - \operatorname{tg}\alpha = 0, \quad (4)$$

де  $\theta$  – азимут простягання тріщини, градуси;  $\alpha$  – кут падіння, градуси;  $x, y, z$  – координати початку тріщини, м.

При цьому кут між площинами тріщин в [16] пропонується визначати з виразу (5):

$$\cos\varphi = \pm(\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \times \sin\alpha_1 \cdot \sin\alpha_2 + \cos\alpha_1 \cdot \cos\alpha_2). \quad (5)$$

Для якісної оцінки покладу декоративного каменю необхідно оцінити точність визначення кутових співвідношень між площинами тріщин. З цією метою було виконане перетворення виразу (5) для одержання виразу для кута  $\varphi$  з подальшим послідовним диференціюванням за  $\theta_1, \theta_2, \alpha_1, \alpha_2$  згідно класичного підходу теорії похибок та методу найменших квадратів. В результаті одержали вираз для оцінки точності визначення кута між площинами тріщин (6):

$$m_\varphi^2 = \left( \frac{-(\sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1)))}{\sqrt{1 - (\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))^2}} \right)^2 \times \\ \times m_{\alpha_1}^2 \oplus \left( \frac{(\sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1)))}{\sqrt{1 - (\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))^2}} \right)^2 \times \\ \times m_{\alpha_2}^2 \oplus (\operatorname{acos}(\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))) \times \\ \times \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) - \cos(\theta_2) \cdot \sin(\theta_1))^2 \cdot m_{\theta_1}^2 \oplus \\ \oplus (\operatorname{acos}(\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))) \times \\ \times \cos(\theta_2) \cdot \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2))^2 \cdot m_{\theta_2}^2, \quad (6)$$

де  $\theta_1, \theta_2$  – азимуты простягання тріщини, градуси;  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути падіння тріщин, градуси;

Одержані залежності дають можливість створити геометрично-ймовірнісну модель природної окремоті для кожного окремого родовища або його ділянки.

Такий результат дає можливість розробити нову кластерно-геометричну методику управління якістю блочного каменю на основі визначення показника блочності, суть якої полягає у послідовному виконанні наступних операцій для окремих ділянок родовища:

- 1) вимірювання елементів залягання тріщин та відстаней між ними в масиві декоративного каменю;
- 2) виділення основних систем тріщин за азимутами простягання та кутами падіння на основі використання кластерного аналізу методами кластеризації К-середніх з відстанями Чебишева або К-середніх з евклідовими відстанями;
- 3) визначення параметрів систем тріщин: азимутів простягання та падіння та їх дисперсій;
- 4) визначення кутових співвідношень між системами тріщин;
- 5) визначення середніх віддалей між системами тріщин;

6) оцінка похибок визначення кутів між системами тріщин;

7) оцінка ймовірності взаємного перетину площин виділених тріщин;

8) створення моделі природної окремоті у вигляді паралелепіпеда, кутові та лінійні співвідношення у якому прийняті з результатів попередніх етапів та визначення його об'єму з виразу:

$$V_{np} = d_Q d_s d_L \sin \alpha_{QS}, \quad (7)$$

де  $d_Q$  – середня відстань між поперечними тріщинами на ділянці, м;  $d_s$  – середня відстань між поздовжніми тріщинами на ділянці, м;  $\alpha_{QS}$  – середній кут між системою поздовжніх і поперечних тріщин на ділянці, град;  $d_L$  – середня відстань між пластовими тріщинами на ділянці, м;

9) визначення об'єму штучного прямокутного блоку з виразу:

$$V_{шт}^{np} = d_s (d_s - d_L \operatorname{ctg} \alpha_{SL} - (d_Q - d_L \sin \alpha_{SL} \operatorname{ctg} \alpha_{QL}) \sin \alpha_{QS}) \times \\ \times (d_Q - d_L \sin \alpha_{SL} \operatorname{ctg} \alpha_{QL}), \quad (8)$$

де  $\alpha_{SL}$  – середній кут між системою поздовжніх і пластових тріщин, град;  $\alpha_{QL}$  – середній кут між системою поперечних і пластових тріщин, град;

10) визначення блочності родовища декоративного каменю або окремої його ділянки з виразу:

$$V = \left( 1 - \frac{V_{np} - V_{шт}}{V_{шт}} \right) 100 \%, \quad (9)$$

де  $V_{np}$  – об'єм природного блоку, м<sup>3</sup>;  $V_{шт}$  – об'єм штучного блоку, м<sup>3</sup>.

11) послідовному виконанні вищезазначених операцій для кожної з ділянок родовища

12) визначенні технологічних рішень для кожної з обраних ділянок та стратегії управління якістю блочної сировини для максимізації виходу блоків з масиву.

В статті наведено приклад реалізації даної методики для Немирівського родовища лабрадориту. Результати кластерного аналізу наведені у табл. 3.

Ймовірність утворення кута окремоті утвореного двома система тріщин обраховувалась за методами теорії ймовірності для випадку сумісної появи двох подій з наступного виразу:

$$p = \frac{n_1 \cdot n_2}{N(N - n_1)}, \quad (10)$$

де  $N$  – загальна кількість тріщин, шт.;  $n_1, n_2$  – кількість тріщин, які віднесені відповідно до першої та другої систем, шт.

Отже можна зробити висновок, що для Немирівського родовища лабрадориту найбільш ймовірною буде окремість утворена перетином систем тріщин 93° та 125°. Остаточні параметри окремоті будуть наступні: вертикальні кути  $\alpha_{QS} = 114^\circ 59' 48''$ , у горизонтальній площині кут становитиме  $\alpha_{SL} = 48^\circ 9' 14,4''$ . Ймовірність утворення окремоті з такими кутовими співвідношеннями буде становити 57 %.

Враховуючи, що лінійні співвідношення між системами тріщинуватості характеризуються наступними значеннями:  $d_Q = 3,2$  м;  $d_s = 3,0$  м;  $d_{Lp} = 2,0$  м та  $K_{зар} = 0,55$ , то очікувана блочність родовища становитиме 37,054 % з ймовірністю 57 %.

## 6. Обговорення результатів дослідження ефективності методів кластеризації при управлінні процесами видобування блочного каменю

Дослідження ефективності методів кластеризації було значно розширено порівняно з попередніми результатами за рахунок збільшення кількості еталонних вибірок та узагальнення досліджень для цілої групи родовищ лабрадориту.

Набуває актуальності питання щодо ефективності методу кластеризації К-середніх з відстанями Чебишева для інших типів родовищ декоративного каменю. Одержані результати дозволяють вважати перспективними для майбутніх досліджень вивчення закономірностей формування систем тріщин порід, які відрізняються за генезисом від лабрадоритів. Крім того виділені системи тріщин мають досить широкий діапазон значень, що вимагає оцінки умов їх утворення. Одержаний коефіцієнт кореляції 0,56 для вертикальних тріщин (кут падіння 85°–90°), для різних груп тріщин, групування яких виконане за кутами падіння, свідчать про генетичну спорідненість вертикальних систем тріщин, виникнення яких часто пов'язують з тектонічними процесами, які відбувались в районі розташування родовища. Тобто можна висунути гіпотезу про можливість прогнозу орієнтації систем вертикальних тріщин на основі аналізу геометрії тектонічних розломів в районі розташування родовища. Також цікавими є результати щодо оцінки кореляційного зв'яз-

Таблиця 3

Результати кластерного аналізу тріщинуватості Немирівського родовища лабрадориту

Азимут простягання системи тріщин, градуси	Кількість, шт	Дисперсія	Кут падіння системи тріщин, градуси	Дисперсія	Кут між системами тріщин, градуси	Похибка визначення, градуси	Ймовірність взаємного перетину
93°19'48"	6	3671,8	31°40'12"	15,1	112°58'37"	30,059	0,06
242°30'00"	12	5660,0	86°00'00"	10,3			
93°19'48"	6	3671,8	31°40'12"	15,1	48°9'14,4"	6,8663	0,19
125°00'00"	24	6614,1	73°42'36"	284,1			
242°30'00"	12	5660,0	86°00'00"	10,3	114°59'48"	26,373	0,38
125°00'00"	24	6614,1	73°42'36"	284,1			

ку між орієнтацією тріщин і їх кількістю. Визначена орієнтація основних систем тріщин для родовищ лабрадориту дозволяє виділити основні напрямки розвитку гірничих робіт. Це значно підвищує ефективність управління якістю технологічних процесів за рахунок уточнення просторової орієнтації площин відокремлення.

Розроблена в роботі кластерно-геометрична методика визначення блочності дозволяє оцінити ймовірність кожного з одержаних результатів, що дозволяє підвищити ступінь врахування генезису тріщинуватості та взаємних кутових співвідношень між системами тріщинуватості та дає можливість підвищити достовірність оцінки якості як всього родовища, так і окремих його ділянок значно підвищує ефективність оцінки ризиків при проектуванні видобувних робіт та ефективність управління якістю покладу декоративного каменю. Запропонована методика управління якістю блочної сировини на основі кластерного аналізу дозволить збільшити достовірність прогнозу, але її використання вимагає високої кваліфікації виконавця. Цю проблему в перспективі можна буде вирішити на основі інтегрування даної методики в структуру геоінформаційної системи, яка буде використовуватись при проектуванні розробки родовища декоративного каменю та в процесі управління якістю, на основі оцінки просторової мінливості блочності.

## 7. Висновки

1. Були виділені основні різновиди вибірок елементів залягання природних тріщин для покладів лабрадориту Житомирської області (Україна), що дозволило сформувати еталонні вибірки для найбільш поширених систем:
  - азимут простягання  $45^\circ$ , дисперсія  $20^\circ$ , кут падіння  $85^\circ$ , дисперсія  $5^\circ$ ;
  - азимут простягання  $135^\circ$ , дисперсія  $40^\circ$ , кут падіння  $85^\circ$ , дисперсія  $5^\circ$ ;
  - азимут простягання  $215^\circ$ , дисперсія  $30^\circ$ , кут падіння  $80^\circ$ , дисперсія  $5^\circ$ ;
  - азимут простягання  $305^\circ$ , дисперсія  $40^\circ$ , кут падіння  $80^\circ$ , дисперсія.
2. На основі аналізу еталонних вибірок з сорока, шістдесяти, ста та двохсот значень азимутів та кутів

падіння тріщин було доведено, що метод кластеризації К-середніх з відстанями Чебишева дозволяє найбільш ефективно систематизувати тріщинуватість покладів лабрадориту.

3. Виділення систем тріщин для основних родовищ лабрадоритів Житомирської області з застосуванням кластерного аналізу дозволило виділити характерні для кожного родовища системи тріщин. В цілому для всіх родовищ лабрадоритів Житомирської області було виділено 19 систем вертикальних тріщин, 21 систему субвертикальних тріщин, 2 системи субгоризонтальних тріщин та 1 систему горизонтальних тріщин.

4. Оцінка впливу орієнтації тріщин на їх кількість дозволила одержати аналітичний вираз залежності кількості тріщин від азимуту простягання у вигляді поліному другого ступеня, що може бути використано для прогнозування напрямку розвитку гірничих робіт та управління процесами видобування декоративного каменю.

5. Для оцінки перспективності розробки родовищ або окремих ділянок та розробки стратегії щодо управління якістю, запропоновано нову кластерно-геометричну методику управління якістю блочного каменю на основі визначення показника блочності та наведено приклад її реалізації для умов Немирівського родовища лабрадоритів. Суть методики полягає у виділенні основних систем тріщин за азимутами простягання та кутами падіння на основі використання кластерного аналізу методами кластеризації К-середніх з відстанями Чебишева або К-середніх з евклідовими відстанями; визначенні параметрів систем тріщин: азимутів простягання та падіння та їх дисперсій та кутових і лінійних співвідношень між системами тріщин; оцінкою похибок визначення кутів між системами тріщин та ймовірностей взаємного перетину площин виділених тріщин; створенні моделі природної окреомості, кутові та лінійні співвідношення у якому прийняті з результатів попередніх етапів та визначення блочності, як співвідношення об'ємів природної та штучної окреомостей з оцінкою ймовірності її утворення для умов даного родовища. Метою виконаних операцій є визначення технологічних рішень для кожної з обраних ділянок та стратегії управління якістю блочної сировини для максимізації виходу блоків з масиву.

## Література

1. Mosch, S. Optimized extraction of dicepednixon stone blocks [Text] / S. Mosch, D. Nikolayew, O. Ewiak, S. Siegesmund // Environmental Earth Sciences. – 2011. – Vol. 63, Issue 7-8. – P. 1911–1924. doi: 10.1007/s12665-010-0825-7
2. Luodes, H. Evaluation and modeling of natural stone rock quality using ground penetrating radar (GPR) [Text] / H. Luodes, H. Sutinen // Geological Survey of Finland. Special Paper. – 2011. – Vol. 49. – P. 83–90.
3. Pershin, G. Enhanced dicepednixon stone production in quarries with complex natural jointing [Text] / G. Pershin, M. Ulyakov // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, Issue 2. – P. 330–334. doi: 10.1134/s1062739115020167
4. Kalenchuk, K. Characterizing block geometry in jointed rock masses [Text] / K. Kalenchuk, M. Diederichs, S. McKinnon // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2006. – Vol. 43, Issue 8. – P. 1212–1225. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.004
5. Turanboy, A. An approach to geometrical modelling of slope curves and discontinuities [Text] / A. Turanboy, M. Gökay, E. Ülker // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2008. – Vol. 16, Issue 4. – P. 445–461. doi: 10.1016/j.simpat.2008.01.007
6. Alade, S. Modified volumetric joint count to check for suitability of granite outcrops for dicepednixon stone production [Text] / S. Alade, O. Muriana, H. Olayinka // Journal of Engineering Science and Technology. – 2012. – Vol. 7. – P. 646–660.
7. Elci, H. Rock mass block quality designation for marble production [Text] / H. Elci, N. Turk // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – Vol. 69. – P. 26–30. doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.03.004



8. Ülker, E. Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis. A genetic algorithm approach [Text] / E.Ülker, A. Turanboy // Computers & Geosciences. – 2009. – Vol. 35, Issue 7. – P. 1470–1480. doi: 10.1016/j.cageo.2008.08.017
9. Fernández-de Arriba, M. A computational algorithm for rock cutting optimization from primary blocks [Text] / M. Fernández-de Arriba, M. E. Díaz-Fernández, C. González-Nicieza, M. I. Álvarez-Fernández, A. E. Álvarez-Vigil // Computers and Geotechnics. – 2013. – Vol. 50. – P. 29–40. doi: 10.1016/j.compgeo.2012.11.010
10. Mutlutürk, M. Determining the amount of marketable blocks of discerдnixional stone before actual extraction [Text] / M. Mutlutürk // Journal of mining science. – 2007. – Vol. 43, Issue 1. – P. 67–72. doi: 10.1007/s10913-007-0008-4
11. Levytsky, V. H. Decorative stone block quality control based on surface digital photogrammetry [Text] / V. H. Levytsky, R. V. Sobolevsky // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2014. – Vol. 6. – P. 58–66.
12. Sobolevskyi, R. Using cluster analysis for planning mining operations on the granite quarries [Text] / R. Sobolevskyi, I. Korobiichuk, M. Nowicki, R. Szewczyk // 16 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Book 1. – 2016. – Vol. 2. – P. 263–270.
13. Hammah, R. Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joint sets [Text] / R. Hammah, J. Curran // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2010. – Vol. 35, Issue 7. – P. 889–905. doi: 10.1016/s0148-9062(98)00011-4
14. Tokhmechi, B. Investigating the validity of conventional joint set clustering methods [Text] / B. Tokhmechi, H. Memarian, B. Moshiri, V. Rasouli, H. Noubari // Engineering Geology. – 2011. – Vol. 118, Issue 3-4. – P. 75–81. doi: 10.1016/j.enggeo.2011.01.002
15. Turner, A. K. Evaluation, and management of unstable rock slopes by 3-D laser scanning [Text] / A. K. Turner, J. Kemeny, S. Slob, R. Hack // IAEG. – 2006. – Vol. 404. – P. 1–11.
16. Попов, Ю. Н. К методике количественной оценки тектонической трещиноватости [Текст] / Ю. Н. Попов // Известия Томского Ордена Трудового Красного Знамени Политехнического института им. С. М. Кирова. – 1971. – С. 130–136.

